

REDUKTION DER PRODUKTIONSKOSTEN VON SOLARTHERMISCHEN KOLLEKTOREN DURCH SIMULATION DER ABSORBERGEOMETRIE

Alois Resch MSc, Patrick Kefer, DI Hannes Zannantoni, DI Dr. Gerald Steinmaurer
Austria Solar Innovation Center
Roseggerstraße 12, A-4600 Wels
Tel.: +43 7242 / 9396 5568
E-Mail: resch.alois@asic.at

Zusammenfassung

Solarthermische Systeme haben mittlerweile einen hohen technischen Reifegrad erreicht, jedoch besteht im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energietechnologien noch Potential zur Kostenreduktion. Bei der Konstruktion des Absorbers eines Kollektors gibt es zahlreiche Ansatzpunkte zur Reduzierung der Produktionskosten, die aber direkten Einfluss auf den Kollektorwirkungsgrad zeigen und durch den sogenannten „F'-Faktor“ beschrieben werden können. Die Ermittlung dieses Kennwertes durch Messung verursacht wiederum zeitlichen und monetären Aufwand, weshalb im Zuge dieser Projektarbeit eine Simulationsmöglichkeit entwickelt wurde, die es erlaubt, den F'-Faktor sehr rasch und kostengünstig zu ermitteln und damit in der Konstruktion der Absorbergeometrie ein Kosten-/Nutzen-Optimum zu erreichen.

1 Einführung und Motivation

Die Technologie der solarthermischen Energiebereitstellung liefert vor allem für die Warmwasserbereitung und die Heizungsunterstützung bereits einen wichtigen Beitrag zur Realisierung einer nachhaltigen Energieversorgung. Laut der Vision der Internationalen Energieagentur [1] können bis zum Jahr 2050 etwa 16% des Endenergiebedarfes bei Niedertemperatur bzw. 17% des Energiebedarfes zur Raumkühlung durch solarthermische Anlagen gedeckt werden, siehe nachfolgende Abbildung 1.

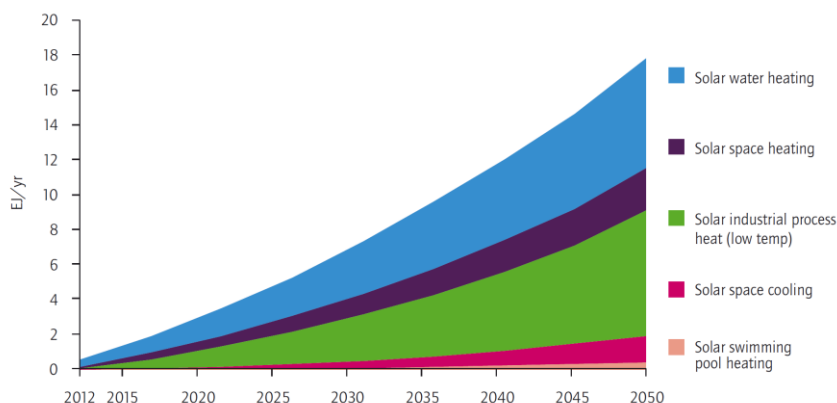


Abbildung 1: Vision für das Wachstum der solarthermischen Energieversorgung [1]

Trotz dieser positiven Aussichten musste die Branche in den letzten Jahren einen deutlichen Rückgang des europäischen Marktes verzeichnen, der durch das Zusammenspiel einiger Faktoren erklärbar wird. Als ein wesentlicher Einflussparameter dieser Entwicklung ist dabei die fehlende Kostenreduktion solarthermischer Systeme zu nennen [2].

Die möglichen Ansatzpunkte zur Reduktion der Kosten eines Solarthermie-Systems für den Endkunden sind sehr vielschichtig. Aus technischer Sicht bietet sich beispielsweise die

Möglichkeit, durch die verstärkte Anwendung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Produktion an der Verringerung der Herstellkosten zu arbeiten [3]. Andererseits können gezielte simulationsgestützte Untersuchungen bereits im Vorfeld der Herstellung zu einer Optimierung von Materialeinsatz und Verarbeitung führen und damit zu einer Reduzierung der Produktionskosten beitragen.

Das Ziel des hier beschriebenen Projektes ist es daher, durch eine Simulation der Absorbergeometrie Aussagen über die Güte der Wärmeübertragung in einem lasergeschweißten Absorber treffen zu können und damit in der Herstellung ein Kosten-/Nutzen-Optimum zu erreichen.

2 Der „F'-Faktor“ als Maß für die Güte eines Absorbers

Zur Bewertung der Wärmeübertragung zwischen Absorber und Wärmeträgermedium eines solarthermischen Kollektors wird der sogenannte „Geometriefaktor“ (auch „F'-Faktor“) herangezogen, der von folgenden Parametern bestimmt wird:

- Dimension des Absorberbleches: Finnenbreite, Blechstärke
- Ausführung der Verbindung zwischen Absorberblech und Absorberrohr
- Wandstärke des Absorberrohres
- Material von Absorberblech und Absorberrohr
- Strömungsverhältnisse im Absorberrohr

Zur Veranschaulichung kann der Schnitt einer Absorberfinne als Netzwerk thermischer Widerstände dargestellt werden, siehe folgende Abbildung 2:

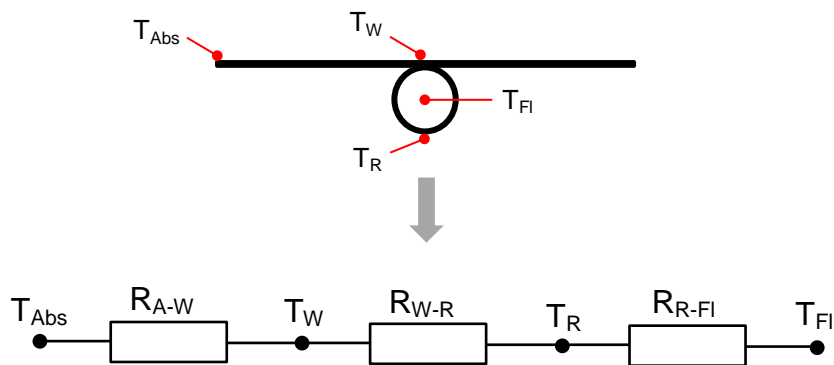


Abbildung 2: Absorberfinne in Schnittdarstellung und als Netzwerk thermischer Widerstände

Dabei werden folgende Temperaturen definiert:

- T_{Abs} ...Temperatur am Absorber
- T_W ...Temperatur an der Wurzel der Absorberfinne
- T_R ...Temperatur des Absorberrohres
- T_{Fl} ...Fluidtemperatur

Die sich damit ergebenden thermischen Widerstände lassen sich wie folgt beschreiben:

- R_{A-W} ...Thermischer Widerstand des Absorberbleches, abhängig von Finnenbreite, Blechstärke und Material
- R_{W-R} ...Thermischer Widerstand der Absorber-Rohr-Verbindung, abhängig von der Art der Verbindung (geschweißt, gelötet, geklemmt...), Zusatzstoffen, Geometrien usw.
- R_{R-FI} ...Wärmeübergangswiderstand vom Rohr auf das Fluid, abhängig von der Art der sich ausbildenden Strömung

Der gesamte thermische Leitwert u_{int} zwischen Absorber und Fluid errechnet sich damit zu

$$u_{int} = \frac{1}{R_{A-W} + R_{W-R} + R_{R-Fl}} \quad (1)$$

Zur Berechnung des F'-Faktors wird der interne Leitwert einem für den jeweiligen Absorbertyp charakteristischen Wärmeverlustkoeffizienten U_L gegenübergestellt [4]:

$$F' = \frac{u_{int}}{u_{int} + U_L} \quad (2)$$

Der Einfluss des F'-Faktors auf den Kollektorstufenwirkungsgrad η wird anhand folgender Gleichung beschrieben [5]:

$$\eta = F' * \tau * \alpha - F' * U_L * \frac{T_m - T_a}{G_k} \quad (3)$$

τ ...Transmissionsgrad der Abdeckung
 α ...Absorptionsgrad des Absorbers
 T_m ...mittlere Fluidtemperatur
 T_a ...Umgebungstemperatur
 G_k ...Einstrahlung in Kollektorebene

Der F'-Faktor beeinflusst damit unmittelbar die thermische Leistungsfähigkeit eines Kollektors, womit das eingangs erwähnte Projektziel der Kosten-/Nutzen-Optimierung eines Solarabsorbers begründet wird.

3 Simulation der Temperaturen einer Absorberfinne zur Berechnung des F'-Faktors

Um im Zuge einer Kollektorentwicklung den F'-Faktor des einzusetzenden Absorbers im Vorfeld berechnen zu können und damit eine weitere Kenngröße zur Ermittlung des Kollektorstufenwirkungsgrades zu erhalten, ist es notwendig, die Temperaturverteilung auf dem Absorber in stationärem Zustand zu simulieren.

In der hier beschriebenen Arbeit wurde aufgrund der zu erwartenden, hohen Komplexität der Simulation die Betrachtung auf eine einzelne lasergeschweißte Absorberfinne (siehe Abbildung 3) beschränkt, um in einem ersten Schritt diese Einheit des Absorbers ausreichend verifizieren und damit belastbare Ergebnisse liefern zu können.

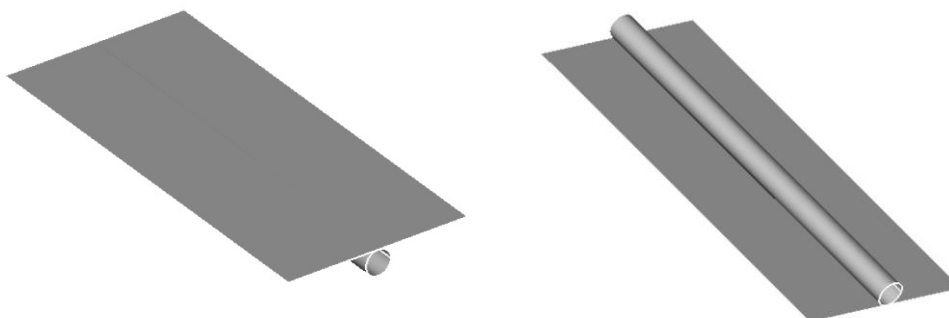


Abbildung 3: Draufsicht und Untersicht der Absorberfinne

Um die Anwendung der Simulation ausreichend flexibel zu halten, werden folgende Absorber- und Betriebsparameter als Variablen definiert:

- Geometrie der Absorberfinne (Länge x Breite)
- Materialstärke des Absorberbleches
- Abstand der Schweißpunkte in Längsrichtung
- Geometrie (Länge x Breite) und Materialstärke der Schweißpunkte
- Wandstärke und Innendurchmesser des Absorberrohres
- Material des Absorberbleches, der Schweißpunkte und des Rohres
- Massenstrom und Fluid-Eintrittstemperatur
- Einstrahlung auf das Absorberblech
- Absorptionskoeffizient des Absorbers
- Umgebungstemperatur

Basierend auf diesen Eingangsdaten kann eine Simulation der Temperaturverteilung auf der Absorberfinne nach der Methode der Finiten Elemente erfolgen. Die Anzahl der Elemente in Längsrichtung entspricht dabei der Anzahl der Schweißpunkte, hingegen ist die Finnenbreite konstant in 60 Bereiche unterteilt. Damit wird z.B. für eine Finne mit 1 m Länge und einem Schweißpunktabstand von 3 mm eine Gesamtanzahl von 20.000 Elementen berechnet.

Für jedes dieser Elemente wird die Absorbtemperatur im stationären thermischen Gleichgewicht berechnet, wobei dazu folgende Mechanismen Berücksichtigung finden:

- *Energieeintrag*: Entspricht der eintreffenden Einstrahlung auf das Absorberblech
- *Wärmeverlust durch Leitung*: Angenommen wird eine rückseitige Dämmung des Absorberbleches entsprechend dem Einbau in einem Kollektor
- *Wärmeverlust durch Konvektion*: Aufgrund der nicht vorhandenen Abdeckung des Absorbers bildet sich freie Konvektion aus, die dem Absorberblech Energie entzieht.
- *Wärmeverlust durch Strahlung*: Berücksichtigt den Strahlungsaustausch zwischen Absorberblech und umgebenden Flächen, die sich auf dem Temperaturniveau der Umgebung befinden.

Die genaue Berechnung des Wärmeübergangswiderstandes zwischen Rohrrinnenwand und Fluid (siehe Abbildung 2) muss für jedes Element in Längsrichtung erfolgen, da sich mit jedem Schweißpunkt eine Temperaturerhöhung im Fluid ergibt, die Auswirkung auf die Stoffdaten und damit auf die Reynolds-Zahl hat. Diese beschreibt die Turbulenz der Rohrströmung und bestimmt damit wesentlich den Wärmeübergangswiderstand zum Rohr [6].

Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Simulation der Temperaturverteilung einer Absorberfinne.

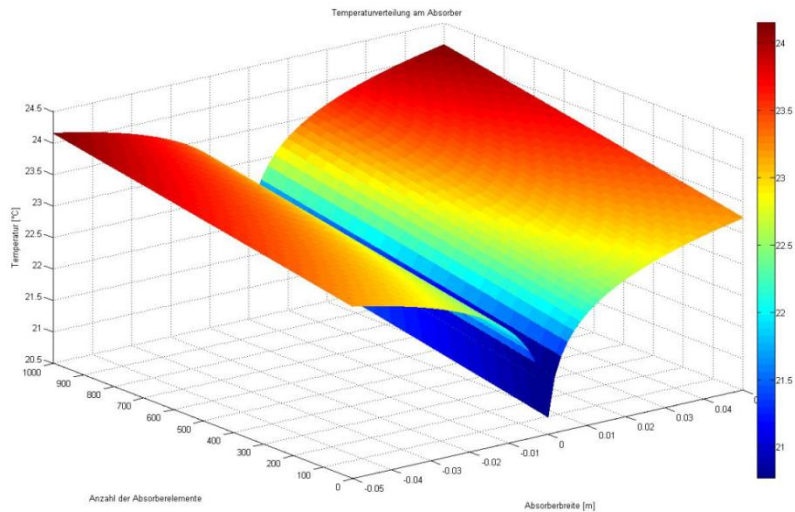


Abbildung 4: Simulation der Temperaturverteilung auf einer Absorberfinne

Im Simulationsergebnis gut erkennbar ist die Temperaturerhöhung des Fluides in Strömungsrichtung (Eintrittstemperatur = 20°C), sowie die Temperaturüberhöhung in den Randbereichen der Finne.

Für jedes der in diesem Beispiel 20.000 Absorberelemente steht nun eine Absorbertemperatur zur Verfügung, die für die Ermittlung des F' -Faktors verwendet wird.

4 Verifizierung der Simulation durch Messung

Zur Verifizierung der Simulationsergebnisse ist es notwendig, die Temperaturverteilung auf entsprechenden Absorberfinnen unter Laborbedingungen messtechnisch zu erfassen.

4.1 Auswahl an Absorberproben

Die Anzahl an variablen Absorber- und Betriebsparametern ist wie oben bereits erwähnt sehr groß, weshalb nicht alle Kombinationen von Parametervariationen vermessen werden können. Zur Verifizierung der Simulation kommt daher eine beschränkte Auswahl an Absorberproben zur Vermessung (siehe Tabelle 1), die so hergestellt sind, dass die Vergleichsmessung Aussagen über den Einfluss folgender Parameter liefern kann:

- Schweißpunkt-
abstand
- Querschnittsform des Absorberrohres
- Rohrwandstärke
- Material des Absorberrohres

Tabelle 1: Übersicht der Absorberproben

	Schweißparameter	Ausführung des Absorberrohres			Schweißpunkt- abstand [mm]
		Dimension [mm]	Querschnitt	Material	
Probe 1	9500 W / 1,2 ms	9 x 0,35	kreisrund	Cu	3
Probe 2	9500 W / 1,2 ms	9 x 0,35	kreisrund	Cu	5
Probe 3	9500 W / 1,2 ms	9 x 0,35	oval	Cu	3
Probe 4	9500 W / 1,2 ms	9 x 0,3	oval	Cu	3
Probe 5	8500 W / 1,2 ms	11 x 0,8	kreisrund	Al	3

Das Absorberblech besteht bei allen Proben aus Aluminium, die Abmessungen betragen ca. 1600 x 93 mm², das Absorberrohr hat eine Länge von ca. 1800 mm.

4.2 Messung der Absorberproben

Das ASiC betreibt einen akkreditierten Prüfstand für solarthermische Kollektoren und ist daher mit der Durchführung von verschiedenartigen, hydraulischen und elektrischen Mess- und Prüfverfahren betraut. Eine zentrale Komponente des Prüfstandes bildet der „Sonnensimulator“, mithilfe dessen die zu prüfenden Kollektoren mit einer Einstrahlung beaufschlagt werden, die ausreichend nahe an AM1.5 liegt, siehe Abbildung 5.



Abbildung 5: Kollektorvermessung am ASiC-Prüfstand

Der akkreditierte Solarprüfstand wird auch für Transmissions- und Absorptionsmessungen von Kollektorkomponenten verwendet, sodass auch für die Vermessung der Absorberproben zur Ermittlung des F' -Faktors eine zuverlässige Messumgebung zur Verfügung steht.

Zur Aufnahme der Absorberproben kommt eine Holzbox zum Einsatz, die mit Steinwolle ausgekleidet ist, um die Wärmeverluste über die Rückseite der Absorberfinne zu reduzieren, siehe Abbildung 6.



Abbildung 6: Aufnahme der Absorberfinne in wärmegeämmter Holzbox

Wie in Kapitel 2 beschrieben ist für die Ermittlung des F' -Faktors die Messung von vier Temperaturen notwendig: Temperatur am Absorber T_{Abs} , Temperatur an der Wurzel der Absorberfinne T_W , Temperatur des Absorberrohres T_R und Fluidtemperatur T_{Fl} .

In Abbildung 7 ist die Positionierung der Temperaturfühler auf der Finne dargestellt. Obwohl die Temperaturverteilung symmetrisch zum Absorberrohr erwartet wird, erfolgt eine

Temperaturmessung auf beiden Seiten der Finne, um durch anschließende Mittelwertbildung eine noch höhere Genauigkeit der Messergebnisse zu erreichen.

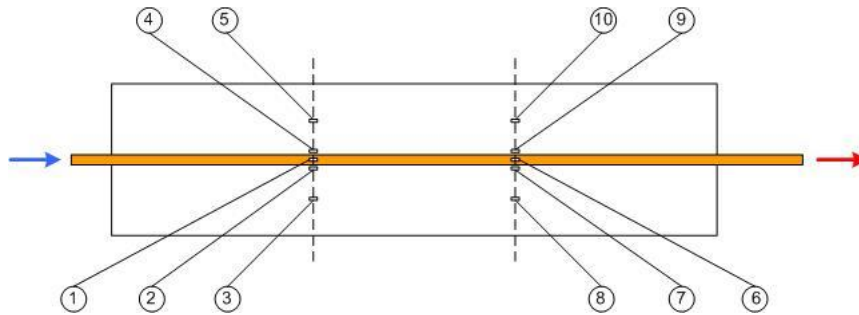


Abbildung 7: Schematische Positionierung der Temperatursensoren auf der Absorberfinne

Auch die doppelte Ausführung der Messung nahe am Fluideintritt (bei 33% der Finnenlänge) bzw. nahe am Fluidaustritt (bei 66% der Finnenlänge) ist in einer Erhöhung der Messgenauigkeit begründet.

Es gilt folgende Zuordnung der Temperaturfühler:

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Fühler 1: T_R Eintritt | Fühler 6: T_R Austritt |
| Fühler 2: T_W rechts Eintritt | Fühler 7: T_W rechts Austritt |
| Fühler 3: T_{Abs} rechts Eintritt | Fühler 8: T_{Abs} rechts Austritt |
| Fühler 4: T_W links Eintritt | Fühler 9: T_W links Austritt |
| Fühler 5: T_{Abs} links Eintritt | Fühler 10: T_{Abs} links Austritt |

Abbildung 8 zeigt die mit Fühlern bestückte Finnenunterseite nahe am Fluidaustritt:

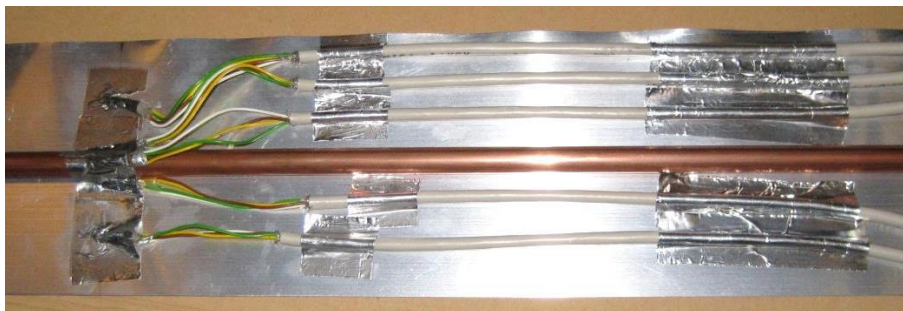


Abbildung 8: Montierte Temperatursensoren auf der Absorberfinne nahe am Fluidaustritt

Die Messung der Fluidtemperaturen am Eintritt und am Austritt erfolgt über die Temperatursensoren, die in die Prüfstandshydraulik fix integriert sind.

Messbedingungen:

- Einstrahlung in Absorberebene: ca. 800 W/m^2
- Umgebungstemperatur: ca. 24°C
- Massenströme: ca. 90 kg/h , ca. 60 kg/h , ca. 40 kg/h , ca. 20 kg/h

4.3 Messergebnisse und Abgleich mit Simulation

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die detaillierten Ergebnisse der F' -Faktor-Ermittlung per Messung bzw. per Simulation dargestellt.

Tabelle 2: Messergebnisse und Abgleich mit Simulation

	Ausführung des Absorberrohres			Schweißpunkt- abstand [mm]	Durchfluss [kg/h]	F'-Faktor Messung [%]	F'-Faktor Simulation [%]	Abweichung [Prozent- punkte]
	Dimension [mm]	Querschnitt	Material					
Probe 1	9 x 0,35	kreisrund	Cu	3	90,16	95,32%	95,46%	0,14%
					59,44	94,79%	95,16%	0,37%
					40,28	93,43%	94,87%	1,44%
					19,19	93,30%	94,14%	0,84%
Probe 2	9 x 0,35	kreisrund	Cu	5	94,76	95,07%	94,61%	-0,46%
					59,34	94,53%	94,06%	-0,47%
					39,55	93,56%	93,55%	-0,01%
					19,37	92,99%	92,40%	-0,60%
Probe 3	9 x 0,35	oval	Cu	3	92,51	95,52%	95,55%	0,03%
					58,95	95,10%	95,23%	0,13%
					39,85	93,89%	94,94%	1,05%
					18,32	94,19%	94,19%	0,01%
Probe 4	9 x 0,3	oval	Cu	3	96	95,19%	95,45%	0,26%
					59,17	94,73%	95,11%	0,38%
					39,3	93,41%	94,80%	1,39%
					20,17	93,56%	94,15%	0,60%
Probe 5	11 x 0,8	kreisrund	Al	3	94,89	95,14%	95,20%	0,06%
					58,53	93,71%	94,83%	1,11%
					40,02	93,53%	94,49%	0,96%
					19,09	93,44%	93,67%	0,22%

Folgende Erkenntnisse können aus den Messergebnissen gewonnen werden:

- Die Vergrößerung des Schweißpunktabstandes von 3 mm auf 5 mm bringt nur minimale Verschlechterung des F'-Faktors um ca. 0,3 Prozentpunkte.
- Die Verwendung einer ovalen Querschnittsform für das Absorberrohr bringt eine Verbesserung des F'-Faktors um 0,2 bis 0,9 Prozentpunkte. Vor allem im laminaren Strömungsbereich wirkt der ovale Querschnitt positiv auf den Wärmeübergang im Rohr.
- Die Reduzierung der Rohrwandstärke auf 0,3 mm zeigt eine Verringerung des F'-Faktors um 0,3 bis 0,6 Prozentpunkte.
- Die Verwendung von Aluminium anstelle von Kupfer als Material für das Absorberrohr zeigt im Vergleich der Probe 5 mit der Probe 1 vernachlässigbare Auswirkung auf den F'-Faktor.

Der Vergleich von Messung und Simulation bringt folgende Ergebnisse:

- Die Abweichung zwischen den gemessenen und simulierten F'-Faktoren liegt zwischen -0,6 und +1,44 Prozentpunkten.
- Negative Abweichung ist bei der Simulation der Probe 2 mit 5 mm Schweißpunktabstand erkennbar.
- Die größten positiven Abweichungen treten bei Massenströmen von ca. 40 kg/h bzw. 60 kg/h auf. In diesen Fällen liegt die Reynolds-Zahl der Rohrströmung dabei um $Re = 2000$, also im oberen laminaren Bereich.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Bewertung des F' -Faktors dazu geeignet ist, um in der konstruktiven Ausführung bzw. im Betrieb von Solarabsorbern ein Kosten-/Nutzen-Optimum zu erreichen und so zur Kostenreduzierung von solarthermischen Systemen beitragen zu können. Die entwickelte und verifizierte Simulation stellt dazu eine sehr rasche und einfache Methode dar, um den F' -Faktor auch ohne kosten- und zeitaufwändige Messung ermitteln zu können.

Die Genauigkeit der Simulation hat aufgrund der geringen Variation der gemessenen F' -Faktoren noch Potential zur Verbesserung. Vor allem die systematische Abweichung im oberen laminaren Strömungsbereich deutet darauf hin, dass die verwendeten Berechnungsmodelle für Reynolds-Zahlen um 2000 nicht ausreichend geeignet sind. Im weiteren Verlauf des Projektes wird daher angestrebt, die Strömungsmodelle in der Simulation auf die hier betrachteten spezifischen Anwendungsfälle zu optimieren und so eine höhere Genauigkeit zu erreichen.

Quellen

- [1] International Energy Agency: Technology Roadmap – Solar Heating and Cooling; Paris; 2012
- [2] Welling, Robin M.: Entwicklung der europäischen Solarmärkte 2012; Paper zum Symposium Thermische Solarenergie in Bad Staffelstein; Söll; 2013
- [3] Resch, Alois; Kefer, Patrick; Steinmaurer, Gerald: Quality assurance for solar thermal collector production; International Conference on Solar Heating and Cooling; Freiburg; September 2013
- [4] Rumler, Nele: Bericht über die Ermittlung des internen thermischen Leitwertes von Absorberstreifen; Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal; D-31860 Emmerthal; 2008
- [5] Frey, R.; Frei, U.; Brunold, S.: Bestimmung des Kollektorwirkungsgradfaktors F' an flüssigkeitsführenden Solarabsorbern; Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle SPF-ITR; CH-8460 Rapperswil
- [6] Böckh von, Peter; Wetzel, Thomas: Wärmeübertragung, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009

Name: Resch
Vorname: Alois
Institut, Firma, Organisation: Austria Solar Innovation Center
Schwerpunkte: Erneuerbare Energietechnologien
Sonstiges: